

レーザー・レーダーによる分光計測に関する研究

著者	小林 喬郎
号	321
発行年	1976
URL	http://hdl.handle.net/10097/11270

氏 名	こ ばやし たか お 小 林 喬 郎
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 5 2 年 1 月 1 2 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 4 1 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻修士 課程修了
学 位 論 文 題 目	レーザー・レーダーによる分光計測に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 稲場 文男 東北大学教授 高橋 正 東北大学教授 虫明 康人 東北大学教授 柴田 幸男

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 総 論

1960年にレーザーが出現し、高出力で単色性や指向性の優れたコヒーレント光の発生が可能になると、直ちにこれらの特質を活用して遠方の物体や状態を検知する装置としてレーザー・レーダーの研究開発が活発に開始された。その動作原理は従来のマイクロ波などの電波領域のレーダーと共通しており、機能の面でも類似したものが多く開発されて来た。たとえば、地上物体の測距や速度測定、人工衛星のトラッキングや月面測距などへ利用されている。また、新しい応用面としてレーザー・レーダー技術は地球大気の観測の分野にも拡張され、大気中のエアロゾル粒子のミー散乱光を検出して、超高層におけるエアロゾル層の観測や対流圏での温度逆転層や雲や霧の生成消滅過程の追跡、大気汚染粒子の拡散状態の測定など、局所的な大気状態の観測に利

用されて、従来の技術では達成できない高精度の測定が可能となり、広い分野において重要な遠隔計測の手段となってきた。

しかしながら、このような大気状態やレーザー光の大気伝搬特性などの精密な情報を得るためには、従来のエアロゾル粒子以外に大気を構成する各種の分子や原子の高精度測定が重要であることは明らかである。そのためにはレーザー・レーダー独自の動作方式の研究開発が不可欠である。

このような観点から、本論文はレーザー光を利用して大気の分子や原子成分や大気状態を遠隔的に分光計測する新しいレーザー・レーダー技術の確立を目指して行なった基礎的研究の結果をまとめたものである。本文では、まずレーザー・レーダーに利用される光と物質の相互作用の基本的特性を比較検討し、気体分子のラマン散乱断面積を導出すると共に、微弱信号光の高感度・高速度検出法を検討する。つぎに、これらの結果に基づいて提案したレーザー・ラマン・レーダー方式の大気分光分析法の原理と基本的動作特性の理論的、実験的解析を行なう。さらにレーザー・レーダー装置に関して新たなシステム解析を加え、高感度・高精度化を検討し、それによって大気の透過特性と大気温度分布の遠隔計測法を実現すると共に、レーザーや分光測光素子を含む電子工学や光学における種々の装置の改良と検討を行なう。

第2章 レーザー・レーダーによる大気分光分析法の基本的構成

レーザー・レーダーはコヒーレントな光の発振器を内蔵し、それより送り出される光ビームが物体によって後方に反射ないし散乱される光を高感度検出する能動的 (active) な遠隔計測法であり、太陽光や熱輻射などを利用する受動的 (passive) な遠隔計測方式とは明瞭に区別される。本章では、まずレーザー・レーダーの動作原理と特徴を示し、以後の章での定量的解析の基本となるレーザー・レーダー方程式を導いた。これを用いて散乱体までの距離に対する受信光電力の変化特性と、測定における分解能および測定感度を与える基本式を求めた。

つぎに、高出力レーザーや周波数可変レーザーと分光技術とを組合せたレーザー・レーダー方式による大気の遠隔的分光分析法を相互作用過程に基づき分類した。すなわち、ミー散乱、レーリー散乱、ラマン散乱の散乱過程と蛍光過程および吸収過程に分けて、各方式の特徴と断面積の大きさ、安定性、レーザー波長依存性などを比較検討した。その結果、現状のレーザー技術と分光測定技術から判断して、ラマン散乱を利用するレーザー・レーダー方式 (レーザー・ラマン・レーダー) が定量分析に最適であり、多くの物質が同時に測定できる汎用性があることが示された。

第3章 レーザー・レーダー動作のための気体分子の散乱断面積の検討

大気中の各種の気体分子を定量測定するためには、各分子の散乱断面積の高精度の値が必要で

ある。本章ではレーザー・ラマン・レーダーの動作設計に用いるために分子のラマン散乱断面積に関する理論的解析と実験的検討を行なって、それらの値を導出した。

まず、Placzek の分極率理論に基づいて分子の純粋回転ラマン散乱、振動・回転ラマン散乱およびレーリー散乱の断面積とスペクトル分布を計算し、角度依存性や波長変化についても理論的に検討した。

Fig. 1 は以上の解析を基に、混合ガスの一例として排煙のラマンスペクトル強度の計算結果を示す。この図より、スペクトルの干渉効果や装置の検出感度などの実験における動作条件の定量的な検討が可能である。

つぎに、気体分子の振動・回転ラマン散乱断面積の実験的導出を行なうため、紫外域 N_2 パルス・レーザーとパルス・ラマン分光法を組合せた高感度ラマン分光装置を開発した。これを用いて 15 種類の気体分子の N_2 分子に対する相対的ラマン散乱断面積の値が測定できた。その結果、従

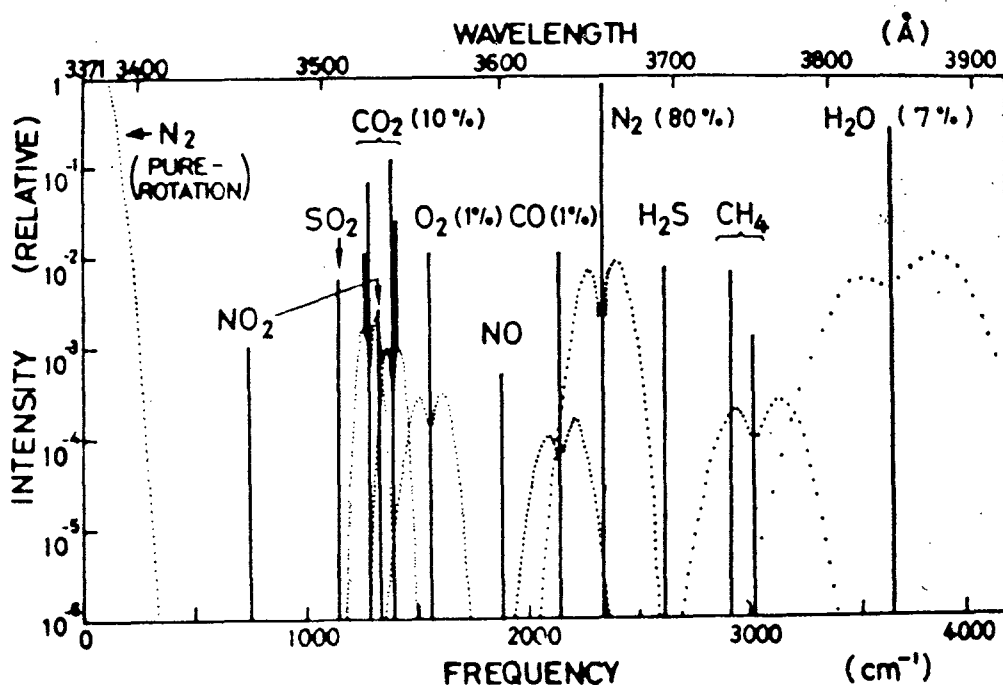


Fig.1 排煙中の分子のラマン体積後方散乱係数のスペクトル分布
(実線：Q-ブランチ、点線：O-およびS-ブランチ)

来ほとんど可視域でのみ測定されていたラマン散乱断面積が紫外域においても比較的高精度（±5%）で求められ、理論値にも良く一致することが明らかとなった。

第4章、極微弱パルス光の高感度・高速度検出法

従来、微弱な光の検出法の研究が行なわれて来たが、そのほとんどは連続光を検出する場合を対象としており、パルス光の検出法についての検討は極めて少ない。そこで本章では、レーザー・レーダーや分光測定装置において重要な技術である極微弱パルス光の高感度で高速度の検出法について詳細な解析を行ない、優れた動作法の実現を目指した。

まず、パルス光検出法を分類し、原理と特徴を述べ、信号対雑音比や最小検出可能電力などの諸特性を解析した。その結果を基に、ゲート幅 0.3 ns でパルス分解時間約 1 ns の応答特性を有するパルス・ゲート光子計数法 (pulse-gated photon counting; PGPC), と呼ばれる検出法を初めて開発した。この方法は、従来の波高分析器等を用いる光子計数法に比べて装置構成が簡単で、微弱な入射光強度領域で雑音阻止能力が大きく、 S/N が大きいことが判った。

また、PGPC法と従来、パルス光の検出に広く用いられているアナログ動作のBoxcar積分法の動作特性を理論的および実験的に比較検討を加えた。その結果、PGPC法はドリフトの影響が極めて少なく、検出器の雑音係数に依存しない動作が可能のため、 S/N の改善ができ、極微弱パルス光の検出に優れていることが明らかになった。

第5章 レーザー・ラマン・レーダーの動作設計と実験的検討

本章では、レーザー・レーダーの新らしい動作方式として提案したレーザー・ラマン・レーダーの動作特性を実証するための実験的検討を行なっている。まず、装置の最適な設計条件を求め、

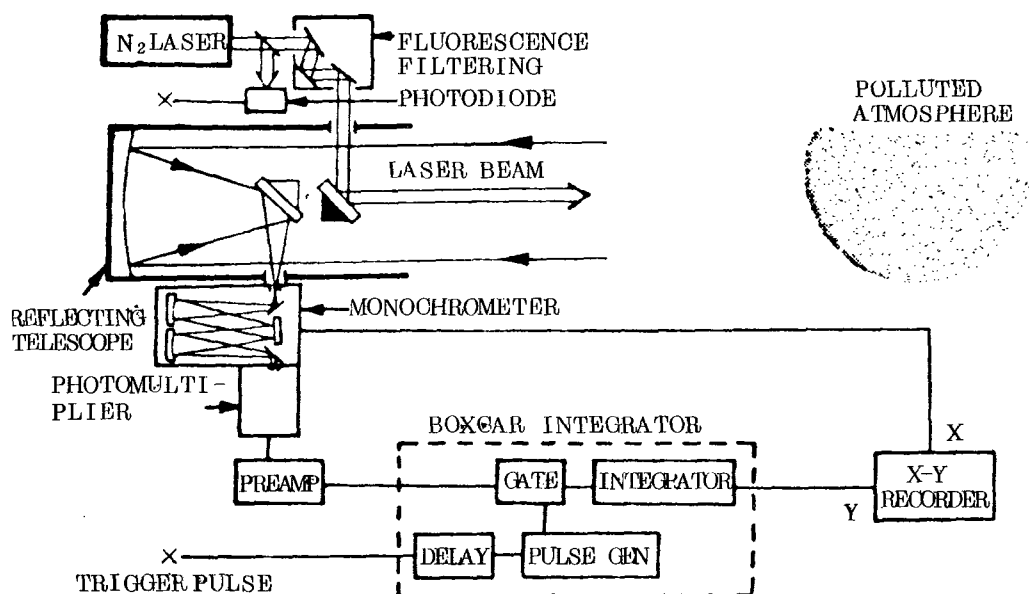


Fig. 2 紫外域N₂レーザーを用いたレーザー・ラマン・レーダー装置ブロック図

レーザー波長の選定や背景光雑音の減少法を検討した。この結果に基づいて2種類のレーザー・ラマン・レーダー装置を試作し、それらを用いて動作実験を行なった。

Fig. 2は、紫外域N₂レーザーを送信器として用い、検出感度とスペクトル分解能の向上をは

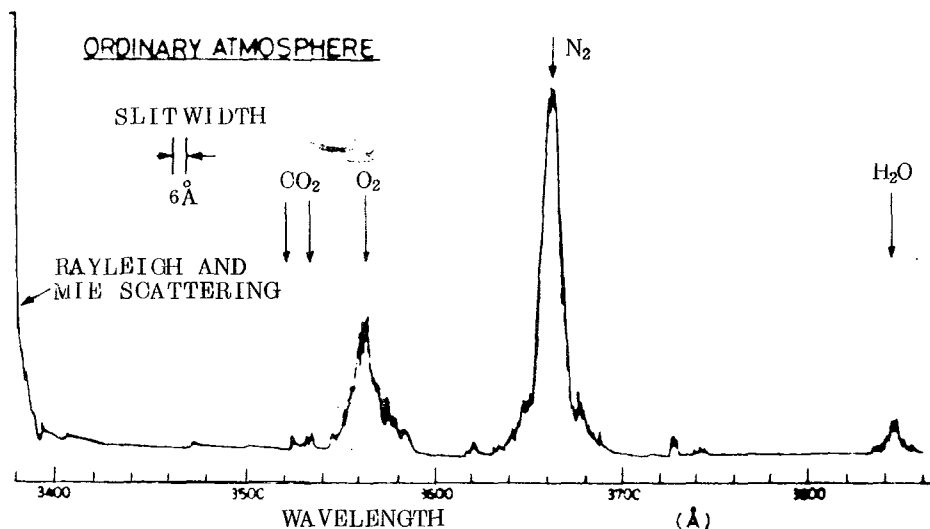


Fig. 3 通常の大気からのラマン散乱スペクトルの観測結果

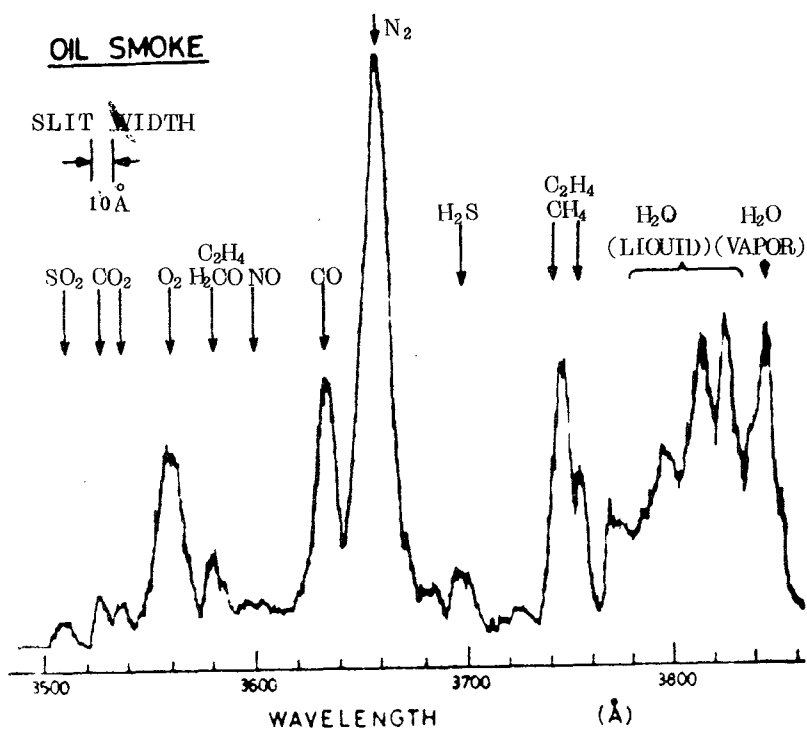


Fig. 4
大気中の灯油燃焼
排煙分子のラマン
スペクトル

かったレーザー・ラマン・レーダー装置のブロック図である。Fig. 3 と 4 に、上記の装置を用いて遠隔測定した、大気からのラマン散乱スペクトルを示す。Fig. 3 は通常の大気、Fig. 4 は大気中の灯油燃焼排煙分子のラマン散乱スペクトルであり、これらの測定結果から多数の分子 (SO_2 , CO_2 , O_2 , H_2CO , C_2H_4 , NO , CO , N_2 , H_2S , CH_4 , H_2O (気体および液体) など) が検出された。また、第 3 章で求めたラマン散乱断面積の値を用いて各分子の密度が導出できた。

以上の検討により、レーザー・ラマン・レーダーにより多種多様な大気における数 100 ppm 以上の比較的高密度の分子成分が遠隔的に定量分析できることが明らかになった。

第 6 章 レーザー・レーダーによる遠隔分光計測法のシステム解析

前章における動作実験の結果より、レーザー・ラマン・レーダーによる微量な物質の遠隔測定法の実用化を図るためには、さらに装置の高感度化が重要であることが判明した。そこで、本章では、レーザー・レーダーによる遠隔的な大気分光分析法のシステム解析を行なって、装置の高感度および高精度化についての問題点を統一的な観点から論じた。

まず、受信光学系の効率とスペクトル選択特性の最適条件を求め、高出力で短波長レーザーの利用による検出感度の向上法を解析した。つぎに、可視や紫外域における可変周波数レーザー光を利用して得られる共鳴ラマン効果の基本的特性を調べ、 NO_2 や I_2 , SO_2 などの分子の検出感度の大幅な向上が可能であることを示した。

さらに、レーザー・ラマン・レーダーの高精度化により得られる新たな機能として、まずレーザー光の大気透過率を遠隔測定する方法について解析した。従来のミー散乱を利用する測定法と比較して、大気中の N_2 分子のラマン散乱を用いるレーザー・ラマン・レーダー方式によって大気透過率や視程が高精度で測定できることが示された。また、信号光の高精度検出法と高分解スペクトル分光法の併用によって、大気の絶対温度分布を遠隔測定するレーザー・ラマン・レーダーについてもシステム解析を加えた。その結果、大気構成分子からの回転ラマン散乱光を検出することによって、室内実験では $\pm 4^\circ\text{C}$ の精度で求められ、また高出力レーザーの利用によって数 km の距離に至るまで約 $\pm 1^\circ\text{C}$ の精度で気温測定が出来ることが検討された。

第 7 章 結 論

本論文で得られた主な成果は次の通りである。

- 1) 気体分子のラマン散乱断面積とスペクトル分布に関する理論的解析を行ない、さらに高感度パルス・ラマン分光装置を開発して多数の分子の振動・回転ラマン散乱断面積を紫外域で高精度測定を行なって導出した。
- 2) パルス信号光の高感度・高速度検出法としてパルス・ゲート光子計数法を詳しく解析した

結果、とくに微弱な入射光の検出に対して雑音が阻止され、S/Nや安定度が改善されて優れた動作が得られた。

3) レーザー・ラマン・レーダーの提案と装置の最適設計法を明らかにし、2種類の装置を試作して動作実験を行なって、大気的主要な分子や汚染物質などの多種多様な分子成分が遠隔的に定量分析できることが初めて示された。

4) レーザー・ラマン・レーダーのシステム解析を行ない、装置の検出感度の向上法を検討し、さらに共鳴ラマン効果の利用により微量な汚染分子密度の高感度測定が可能なが示された。

5) レーザー・ラマン・レーダーに高精度の信号処理法と高分解能分光法の採用により、レーザー光の大気伝搬特性と大気の絶対温度分布の遠隔測定が実現できることが示された。

以上の研究成果を基礎として、今後さらにレーザーの高出力・安定化や可変周波数レーザーの実用化、高分解能分光法の開発、高速で高精度の多元データ処理法の採用などの技術的進展が大いに望まれる。それに伴ってレーザー・レーダーは、広域にわたる大気状態の計測や大気汚染の制御システムに、さらには光通信や光計測システムに最も適したセンサーとしての実用化が進むものと期待される。

審 査 結 果 の 要 旨

レーザー・レーダーは、レーザーのすぐれた電子工学的応用の一つとして近年急速に実用化が進められている。特に、レーザー・レーダーによる人類生存圏の環境情報の遠隔計測は、3次元にわたる実時間のデータ収集が可能な点で注目されているが、その実用開発のためには、レーザー光による遠隔分光技術の確立とその動作特性の解明が必要である。

著者はこのような観点から、強力なレーザー光によるラマン散乱を利用した新しいレーザー・レーダー方式の実現に取組み、その基礎的特性を詳細に究明すると共に、その独自の応用として大気中の諸種の分子成分の定量分析や湿度および温度の遠隔計測が可能であることを明らかにした。本論文はその成果をとりまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は総論である。第2章では、レーザー・レーダーの動作特性と装置構成の基本的検討を行うと共に、遠隔分光分析法を光と物質の相互作用過程に基づいて比較、分類し、ラマン散乱を利用するレーザー・ラマン・レーダー方式が実時間定量分析に有用であることを論じている。

第3章では、レーザー・ラマン・レーダーの動作設計に用いるために、分子のラマン散乱断面積とスペクトル特性を理論的に解析し、多種の気体分子のラマン散乱断面積を精密に測定して、比較、検討を加えている。

第4章は、レーザー・レーダーの高精度の信号検出処理のための技術として、極微弱パルス光の高感度検出法について解析を加え、著者の新しく開発したパルス・ゲート光子計数法の実験結果をとりまとめたものである。その結果、この方式は従来の検出法に比べて雑音除去能力が高く、しかも安定性にすぐれていることが示された。これらはすぐれた成果である。

第5章では、レーザー・ラマン・レーダー装置の最適設計条件を検討し、それにもとづいて2種類のシステムを試作して、大気中の主要構成分子や汚染ガス分子のラマン散乱光を遠隔測定する動作実験を行い、多種多様な分子成分が実時間で定量分析できることを実証している。これは、レーザー・レーダーに遠隔分光計測方式をはじめとり入れた点で高く評価される。

第6章は、遠隔分光方式レーザー・レーダーに関するシステム解析を試みたもので、この方式の高感度化および高精度化について統一的な観点から論じている。また、この新しいレーザー・レーダー方式により、レーザー光の大気減衰率分布や大気中の絶対温度分布の遠隔測定が実現できることが理論および実験により示されたことは、重要な知見である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、レーザー・レーダーにおいて分光計測による多元周波数情報が極めて

有用であることに着目して、新しいレーザー・ラマン・レーダー方式を考案し、その基本的特性を総合的に解明して、装置の設計、試作に必要な豊富な資料を提供すると共に、大気中の多様な分子成分の実時間遠隔分析をはじめて実現して、いくつかのすぐれた知見を加えたものであって、電子工学ならびにレーザー工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。